第 37 卷第 7 期
2017 年 4 月
生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37，No.7
Apr.，2017

DOI：10.5846/stxb201512012406
龚诗涵，肖洋，郑华，肖燚，欧阳志云.中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素.生态学报，2017，37(7)：2455-2462.
Gong S H，Xiao Y，Zheng H，Xiao Y，Ouyang Z Y.Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis.Acta Ecologica Sinica，2017，37(7)：2455-2462.

中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素

龚诗涵[1,2]，肖　洋[1,2]，郑　华[1]，肖　燚[1]，欧阳志云[1,*]

1 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室，北京　100085
2 中国科学院研究生院，北京　100039

摘要：水源涵养是陆地生态系统重要生态服务功能之一，包含着大气、水分、植被和土壤等自然过程，其变化将直接影响区域气候水文、植被和土壤等状况，是区域生态系统状况的重要指示器。我国水资源贫乏，降水时空分布不均，在区域尺度上评估全国生态系统水源涵养功能空间特征及其影响因素，对科学认识和合理保护我国生态系统水源涵养，和制定生态环境保护决策具有十分重要的意义。以全国生态系统水源涵养功能为研究对象，通过收集和分析相关数据，对各类典型生态系统水源涵养数据进行归类与统计，在区域尺度上评估中国生态系统水源涵养功能，并分析气候与人类活动对其影响。结果表明：(1) 中国水源涵养总体上呈现东南高西北低、由东到西逐渐递减特征。2010 年全国生态系统水源涵养总量为 12224.33 亿 m^3。(2) 森林是我国生态系统水源涵养的主体，其水源涵养量最高，占全国水源涵养总量的 60.80%。其中，常绿针叶林生态系统水源涵养量最多，而常绿阔叶林水源涵养能力最高。按流域统计，相对于其他一级流域，长江流域生态系统的水源涵养量最高。(3) 中国生态系统水源涵养受气候和人类活动的影响，与降水、温度、蒸散、坡度、COD 密度和长江生态工程呈现显著的正相关，而与 GDP 密度和农村人口密度呈现明显的负相关。

关键词：水源涵养；空间特征；气候影响；人类活动

Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis

GONG Shihan[1,2]，XIAO Yang[1,2]，ZHENG Hua[1]，XIAO Yi[1]，OUYANG Zhiyun[1,*]

1 *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology*，*Research Center for Eco-Environmental Sciences*，*Chinese Academy of Sciences*，*Beijing* 100085，*China*
2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences*，*Beijing* 100039，*China*

Abstract：Water conservation is an important component of ecosystem services，and is involved in natural processes such as regional climate circulation，the hydrologic cycle，vegetation growth and survival，soil conditions，and other natural processes. It is also an important indicator of regional ecosystem status. Water resources in China are scarce，and precipitation is uneven through time and space. Many researchers have attributed water resource loss in China to long-term human interference and widespread changes in land use and cover. Other studies have found that climate conditions，such as drought，severe storms，and temperature fluctuations are the primary cause of water resource changes. Whatever be the cause，recent studies have shown that human activities can improve the level of water conservation in selected study regions across China. It is necessary to investigate current water level conservation and its response to climatic variation and human activities，which will allow for a better understanding of their accumulated consequences.This study analyzed literature and applied Geographic Information System techniques to analyze the hydrological characteristics of different ecosystems，and to develop a method to assess the water conservation service of different ecosystems at a regional scale while considering how

基金项目：全国生态环境长期跟踪遥感调查(KFJ-EW-ZY-004)
收稿日期：2015-12-01；　　**网络出版日期**：2016-08-30

*通讯作者 Corresponding author.E-mail：zyouyang@ rcees.ac.cn

those water conservation services formed. We quantified the water conservation services of different ecosystems in China comparing those services across different types of ecosystems, basins and elevations separately. We then analyzed the respective effect of climate and human activities on spatial patterns in water conservation services. We found that: (1) In China, water conservation followed a decreasing trend from the southeast to the northwest of inland areas. The total amount of water conserved in China in 2010 was $12224.33 \times 10^8 m^3$. The vast areas south of the Yangtze River, which experience high levels of precipitation, were the primary water conservation area. This included the middle and lower reaches of the Yangtze River; the hilly areas near the southern Yangtze River; the Sichuan basins; and the Yunnan, Guangxi, Guangdong, and Taiwan areas. Conversely, we found relatively weak water conservation services in ecosystems in areas of northeastern China, northeastern Inner Mongolia, northern China, Shaanxi-Gansu-Ningxia province and northwestern Xinjiang province.(2) Ecosystem types performed different water conservation services. Forests were the main carriers of water conservation, as they produced the highest amounts of water conservation. They produced $7432.32 \times 10^8 m^3$, which accounts for 60.80% of the total. The contribution of different forest types to water conservation in decreasing order was as follows: evergreen broadleaf forest>evergreen needleleaf forest>mixed needleleaf and broadleaf forest>deciduous broadleaf forest>deciduous needleleaf forest>sparse forest. Evergreen coniferous forests could produce the most amount of water conservation, however its capacity was not the highest.(3) The spatial characteristics of water conservation services are formed by interactions among several influencing factors. There were partial correlations between water conservation and precipitation, temperature, evapotranspiration, slope, Chemical Oxygen Demand (COD) density and ecological restoration project in the Yangtze River basin were positive and statistically significant. By contrast, water conservation was negatively correlated with the Gross Domestic Product (GDP) of the region and the rural population density. As the social economy developed rapidly, the influence of human activities on water conservation gradually increased. However, climate and topography were still the dominant factors that influenced the spatial characteristics of water conservation. These results provide specific information that may serve to strengthen the necessary public awareness about protecting and restoring water conservation services.

Key Words: water conservation; spatial patterns; climatic interaction; human activities

生态系统不仅为人类提供了粮食、木材、药材及其他工业用品,更重要的是支撑与维持了地球的生命支持系统[1]。过去人类对生态系统的重要性不甚了解,导致了生态环境的破坏,从而损害了生态系统功能[2-3]。由于水是一重要的载体,水源涵养在各项生态系统中处于中心地位,对系统生产力、养分循环等其它功能都会产生影响[4]。在中国,水资源问题十分严重。水资源短缺,水质恶化,空间分布和时间分配不均,洪灾、旱灾频繁,等等,已给人们带来巨大影响。人口的增长、城市化进程的加快以及全球气候变暖也将进一步加剧水资源问题。

生态系统水源涵养功能一直是生态学与水文学研究的热点,已发表了大量的研究成果[5]。生态系统水源涵养功能是一个动态发展中的概念,其内涵随着人们对生态系统与水关系认识的不断深入而变化。早期对水源涵养的研究是指生态系统对河流水量的影响,主要涉及到径流调节部分[6]。后来的生态系统拦蓄降水和土壤含水功能逐渐受到重视[7],并展开了一系列相关研究。

水源涵养功能概念较广,主要表现形式包括生态系统的拦蓄降水,调节径流,影响降雨量,净化水质等。不同生态系统的水源涵养具有差异性,包括不同森林、草地的种类之间及各种群内部的水源涵养能力的差异。特别是森林水源涵养功能,研究者从各种角度进行研究和阐释,并且根据各自对水源涵养功能的理解,提出了不同的见解。总的来看,研究者对森林水源涵养功能的普遍定义是:降水被森林的林冠层、枯落物层和地下土壤层等拦截、吸收和积蓄,从而使降水充分积蓄和重新分配[8-10];也有学者从更广义的角度,将森林净化水质、调节径流和影响雨量等也包含在森林的水源涵养功能内[11]。

近年来中国发生着巨大的变化,人口经济的快速增长、资源的需求进一步增大、生态环境受到一定的冲击。同时政府为了缓解发展的压力,在全国范围内开展了一系列的生态保护与恢复工程(天然林保护、退耕还林还草、京津风沙源治理等)。这些变化必然会影响中国的生态系统水源涵养功能状况,进而影响我国经济和生态环境的可持续发展。因此,研究中国生态系统水源涵养功能状况,客观认识生态系统结构与水源涵养功能,确定水源涵养重要保护区域,探讨生态系统水源涵养变化的驱动因素,为促进我国生态系统管理与保护,缓解日趋严重的水资源问题,实现中国可持续发展具有重要科学意义。

1　研究数据与方法

1.1　研究数据

生态系统类型图主要基于 Landsat TM,环境卫星 HJ 数据采用的面向对象的分类技术获取[12-14]。降水与温度数据,基于普通薄盘和局部薄盘样条函数插值理论,时间范围 1961—2010,来源于中国国家计量信息中心/中国气象局(NMIC/CMA)。实际蒸散发数据,主要用到 MODIS 全球蒸散发产品(MOD16)和气象局基于站点的插值数据,时间范围 2000—2010,数据来源于陆地过程分布式数据档案中心(LP DAAC)和中国科学院地理科学与资源研究所。数字高程模型 DEM,空间分辨率为 90 m,来源于国际科学数据平台。详细数据信息见表 1。

表 1　主要数据来源

Table 1　Sources of principal data

数据名 Data name	分辨率 Data resolution	数据源 Data source
生态系统分类图 Ecosystem classification	90 m	中国科学院遥感与数字地球研究所
降水与温度 Precipitation and temperature	0.05°	中国国家计量信息中心/中国气象局(NMIC/CMA)
蒸散发 Evapotranspiration (ET)	1000 m	陆地过程分布式数据档案中心(LP DAAC),中国科学院地理科学与资源研究所
高程数据 Digital Elevation Model (DEM) data	90 m	国际科学数据平台
行政区划及地理区划 Administrative boundary and geographic boundary	省级, 县级	环境保护部卫星环境应用中心
流域 Watershed	1 级流域	中国科学院地理科学与资源研究所
生态保护工程 Conservation area	县级	政府部门
人口 Population	县级	统计年鉴
交通密度 Traffic density	县级	政府部门
社会经济数据 Socioeconomic data	县域	统计年鉴

1.2　研究方法

水源涵养量与降水量、蒸散发、地表径流量和植被覆盖类型等因素密切相关。水源涵养量计算主要通过水量平衡方程(The Water Balance Equation)计算得到。水量平衡法是将森林生态系统视为一个"黑箱",以水量的输入和输出为着眼点,从水量平衡的角度,降水量与森林蒸散量以及其他消耗的差即为水源涵养量[15]。公式如下:

$$TQ = \sum_{i=1}^{j} (P_i - R_i - ET_i) \cdot A_i \tag{1}$$

式中,TQ 为总水源涵养量(m^3);P_i 为降雨量(mm);R_i 为地表径流量(mm);ET_i 为蒸散发(mm);A_i 为 i 类生态系统的面积;i 为研究区第 i 类生态系统类型;j 为研究区生态系统类型数(此次计算包括森林生态系统 6 类,草地生态系统 6 类,灌丛生态系统 4 类,园地和湿地,详见表 2)。

地表径流量由降雨量乘以地表径流系数获得。地表径流系数是指地表径流量(mm)与降雨量的比值,在一定程度上反应了生态系统水源涵养的能力。地表径流系通过查阅文献资料获得,主要包括公开发表的文献和出版专著上的关于各类型生态系统径流小区的降水、地表径流数据[16-23]。

$$R = P \cdot \alpha \quad (2)$$

式中,R 为地表径流量(mm);P 为年降雨量(mm);α 为平均地表径流系数。地表径流系数详细见表 2。

1.3 数据分析

本文基于流域统计分析,揭示我国水源涵养重要性空间格局。采用 ArcGIS 中的 Spatial Analyst-Zonal Statistics 模块,根据流域统计水源涵养重要性,将水源涵养能力从大到小排序,累积得到水源涵养总量,总量的 50%划分为极重要,其余的 25%划分为重要,剩下的 15%为中等,最后 10%为一般。为了探索水源涵养与气候和人类活动之间的关系,选用皮尔逊相关系数分析。其中气候因素主要考虑降水和温度,人类活动主要考虑人口,国内生产总值 GDP(农业生产总值 GDP1,工业生产总值 GDP2,服务业生产总值 GDP3),交通密度、生态保护工程等。相关性分析均以县域为统计单元,在 SPSS 软件中进行。

表 2 各类型生态系统地表径流系数均值

Table 2 Average runoff coefficient for each ecosystem type

生态系统类型(1 级) Ecosystem type (level 1)	生态系统类型(2 级) Ecosystem type (level 2)	平均径流系数/% Runoff coefficient
森林 Forest	常绿阔叶林	4.65
	常绿针叶林	4.52
	针阔混交林	3.52
	落叶阔叶林	2.70
	落叶针叶林	0.88
	稀疏林	19.20
灌丛 Shrub	常绿阔叶灌丛	4.26
	落叶阔叶灌丛	4.17
	针叶灌丛	4.17
	稀疏灌丛	19.20
草地 Grassland	高寒草甸	8.20
	高寒草原	6.54
	温带草原	3.94
	温性草丛	9.37
	温性草甸草原	9.13
	热带亚热带草丛	3.87
园地 Garden	乔木和灌木园地	9.57
湿地 Wetland	沼泽和水库	0

2 结果与分析

2.1 水源涵养空间特性

中国生态系统水源涵养总体上呈现东南高西北低、由东到西逐渐递减特征,长江以南降水量较高地区的森林生态系统发挥着重要的涵养(图 1)。2010 年全国生态系统水源涵养总量为 12224.33 亿 m^3。其中水源涵养量较高的区域主要集中在武夷山脉、南岭、武陵山区、大巴山区,四川盆地,其次为云贵高原。水源涵养量一般的区域主要分布在长白山与大小兴安岭地带。而蒙古高原、青藏高原以及新疆西北部的水源涵养量较低。地处欧亚大陆低纬度地带的高山区,受人类活动影响较少,植被构成以亚热带和热带常绿阔叶林为主,而且降雨丰富,所有水源涵养量较高。然而,地处高纬度地带的大小兴安岭、长白山区,虽然人类活动干扰较少,植被以寒温带针叶林为主,但是该区域降水较低,植被蒸散量大,所以水源涵养量一般。至于蒙古高原与青藏高原地区,由于海拔较高,属于我国第二、三阶梯,且年降水量在 400 mm 以下,植被构成以草地生态系统为主,所以水源涵养量最低。

由于地理位置、气候条件、植被结构存在空间差异,水源涵养也表现出明显的区别(图 2)。在所有生态系统类型中,森林是我国生态系统水源涵养的主体,其水源涵养量为 7432.32 亿 m^3,约占全国水源涵养总量的 60.80%;灌丛、草地的水源涵养量分别为 1723.68 亿 m^3、1912.54 亿 m^3,各占总量的 14.10%、15.65%。从水源涵养能力来看,水源涵养能力最强的是森林和园地,分别为 39.21 万 $m^3 km^{-2} a^{-1}$ 和 46.79 万 $m^3 km^{-2} a^{-1}$(图 2a)。本研究所估算的全国森林水源涵养量比陈东立等人和鲁绍伟等人的研究结果 3186.18 亿 m^3 和 4933.21 亿 m^3 要大,但数量级一致[24]。估算结果存在差异,主要是因为不同的研究方法和数据来源所致。在森林生态系统中,常绿针叶林水源涵养总量最多,其次为常绿阔叶林。虽然常绿阔叶林水源涵养总量不及常绿针叶林,但是常绿阔叶林水源涵养能力最高。十大江河流域中,长江流域的水源涵养量最高,为 4789.79 亿 m^3,约占全国总量的 39.19%;珠江流域次之,水源涵养量为 2546.84 亿 m^3,约占全国总量的 20.84%(图 2b)。由于长江流域降雨丰富,植被类型多,面积广,所以水源涵养量最高。水源涵养能力而言,能力最强的是东南诸河流域,为 75.74 万 $m^3 km^{-2} a^{-1}$;其次是珠江流域和长江流域,分别为 62.52 万 $m^3 km^{-2} a^{-1}$ 和 40.92 万 $m^3 km^{-2} a^{-1}$。由于东南诸河流域位于亚热带沿海区域,降雨量较多,而且森林径流系数高,森林面积集中,所以水源涵

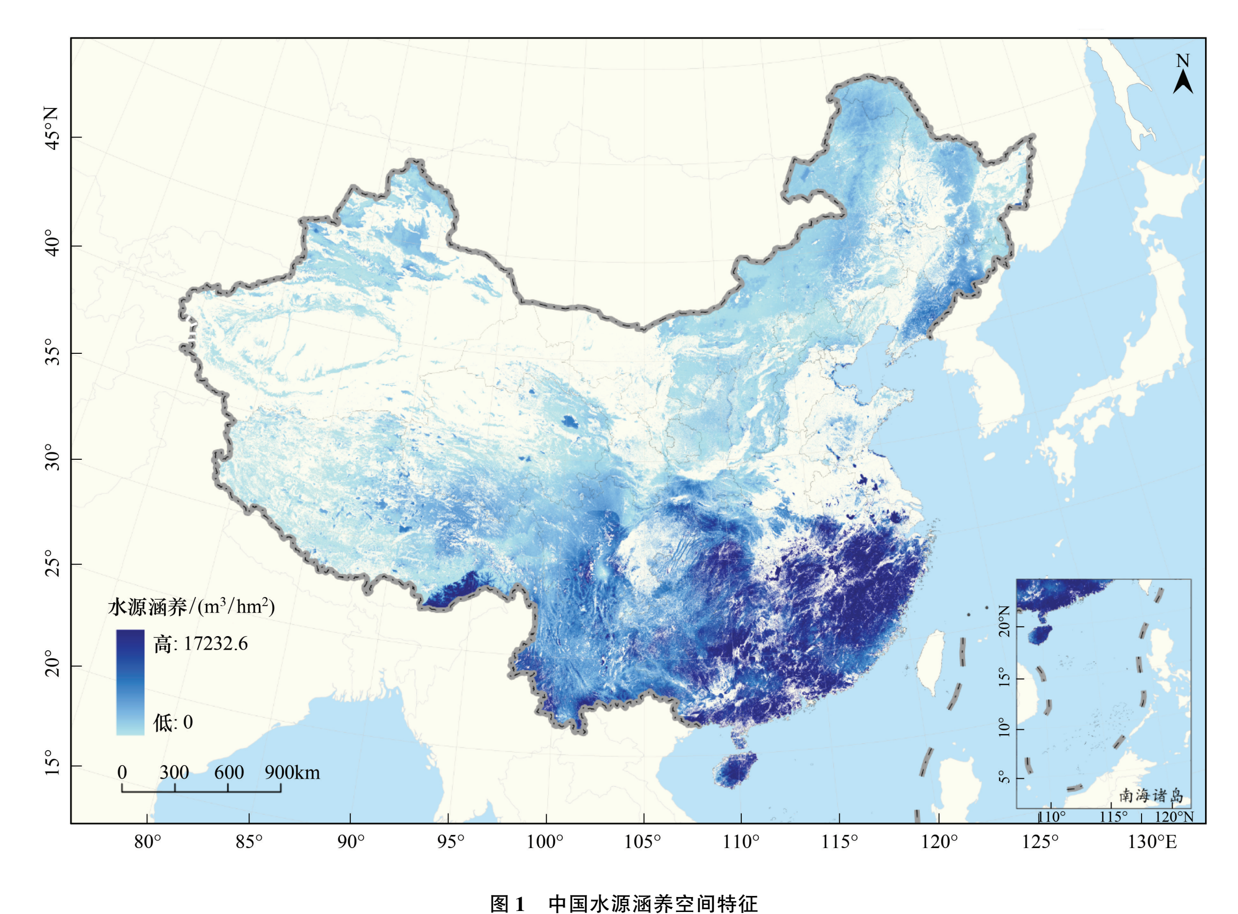


图 1　中国水源涵养空间特征

Fig.1　Spatial pattern of water conservation in China

养能力高。

为揭示我国水源涵养重要性特征,基于流域进行分析。本研究将水源涵养分为一般、中等、重要和极重要 4 个等级,得到全国生态系统水源涵养重要性空间格局(图 3)。统计分析表明,极重要区的水源涵养总量为 6486.57 亿 m^3,约占总面积的 15.18%。重要区的水源涵养总量为 2977.70 亿 m^3,占总面积的 10.75%。一般区的水源涵养总量仅为 1062.85 亿 m^3,但所占面积比例最大,为 65.58%。

2.2　水源涵养与气候、人类活动之间的关系

中国生态系统水源涵养受到气候和人类活动的影响。特别是降水的影响,当降水量超过下垫面的截留、填洼、下渗等时,就会产生地表径流。不论是蓄满产流或是超渗产流,地表径流量都是随降雨量的增大而增大,降水是决定地表径流量的最重要因子,进而影响水源涵养功能[25]。本文首先对水源涵养与所有可能的影响因子做相关性分析,发现与降水、温度、蒸散、坡度相关性较大,还与 GDP 密度、农村人口密度、COD 密度和长江生态工程相关性显著(表 3—表 5)。在自然因素方面,水源涵养与降水、温度、蒸散、坡度呈现显著的正相关($R = 0.812, P < 0.01; R = 0.465, P < 0.01; R = 0.675, P < 0.01; R = 0.415, P < 0.01$)。在人类因素方面,水源涵养与 COD 密度和长江生态工程呈现显著的正相关($R = 0.110, P < 0.01; R = 0.190, P < 0.01$)。然而,与 GDP 密度和农村人口密度呈现明显的负相关($R = -0.068, P < 0.01$; $R = -0.052, P < 0.01$)。水源涵养与降水、温度、蒸散、坡度具有较高的相关性,表明水源涵养主要受地形和气候的影响。这与尹云鹤等人的研究结果较为一致,认为降水量以及大气水分需求能力的变化是影响生态系统水源涵养量增减的主要因素[26]。能力高的水源涵养主要集中在降水丰富、蒸散强度高、温度高、坡度大。此外,生态工程也显著的影响着水源涵养,生态工程实施区内外的相关性存在显著的差异。近些年来,国家重视生态环境保护,在全国范围内实施了一系列的生态工程,特别是在长江流域实施植树造林工程。在工程实施区域,植树造林与天然林保护,对水

源涵养产生了积极正面作用,同时采伐森林等人类活动负面干扰较低,所以该区域水源涵养能力较高。

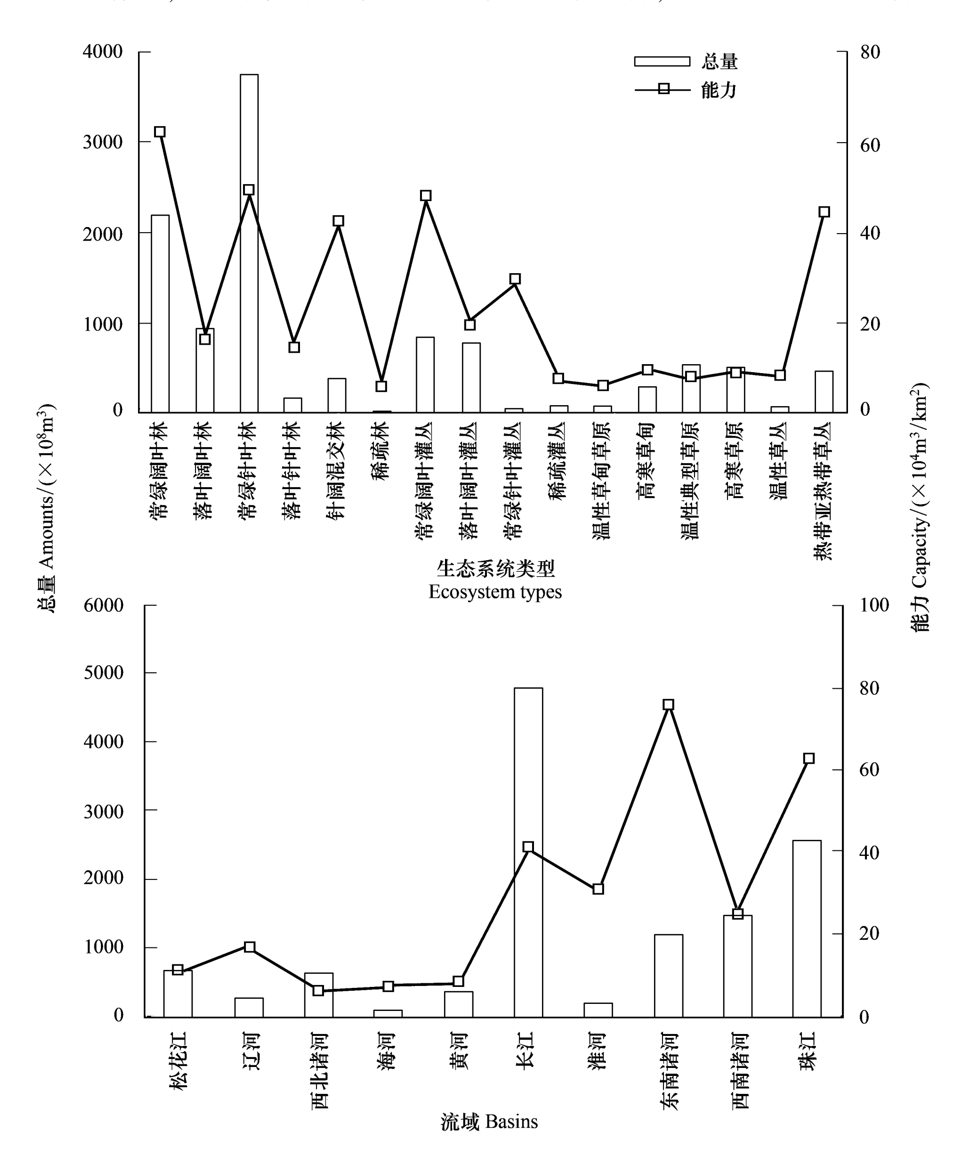


图 2　中国水源涵养空间分布

Fig.2　Spatial distribution of water conservation

表 3　水源涵养与地形和气候因素相关性

Table 3　Pearson correlation among water conservation, topography and climate

	地形 Topography		气候 Climate		
	海拔 Altitude	坡度 Slope	降水 Precipitation	蒸散 Evapotranspiration	温度 Temperature
相关性 Pearson	−0.067	0.415 **	0.812 **	0.675 **	0.465 **
显著性 Significance	0.061	0.000	0.000	0.000	0.000
样本数 Samples	2892	2892	2892	2892	2892

3　结论

本文基于年降雨量、蒸散量和不同生态系统类型径流系数,通过水量平衡方程,计算全国生态系统水源涵养功能,并评估其与气候,人类活动的相关关系,在此基础上探讨了气候和人类活动对水源涵养的影响。得出以下主要结论:

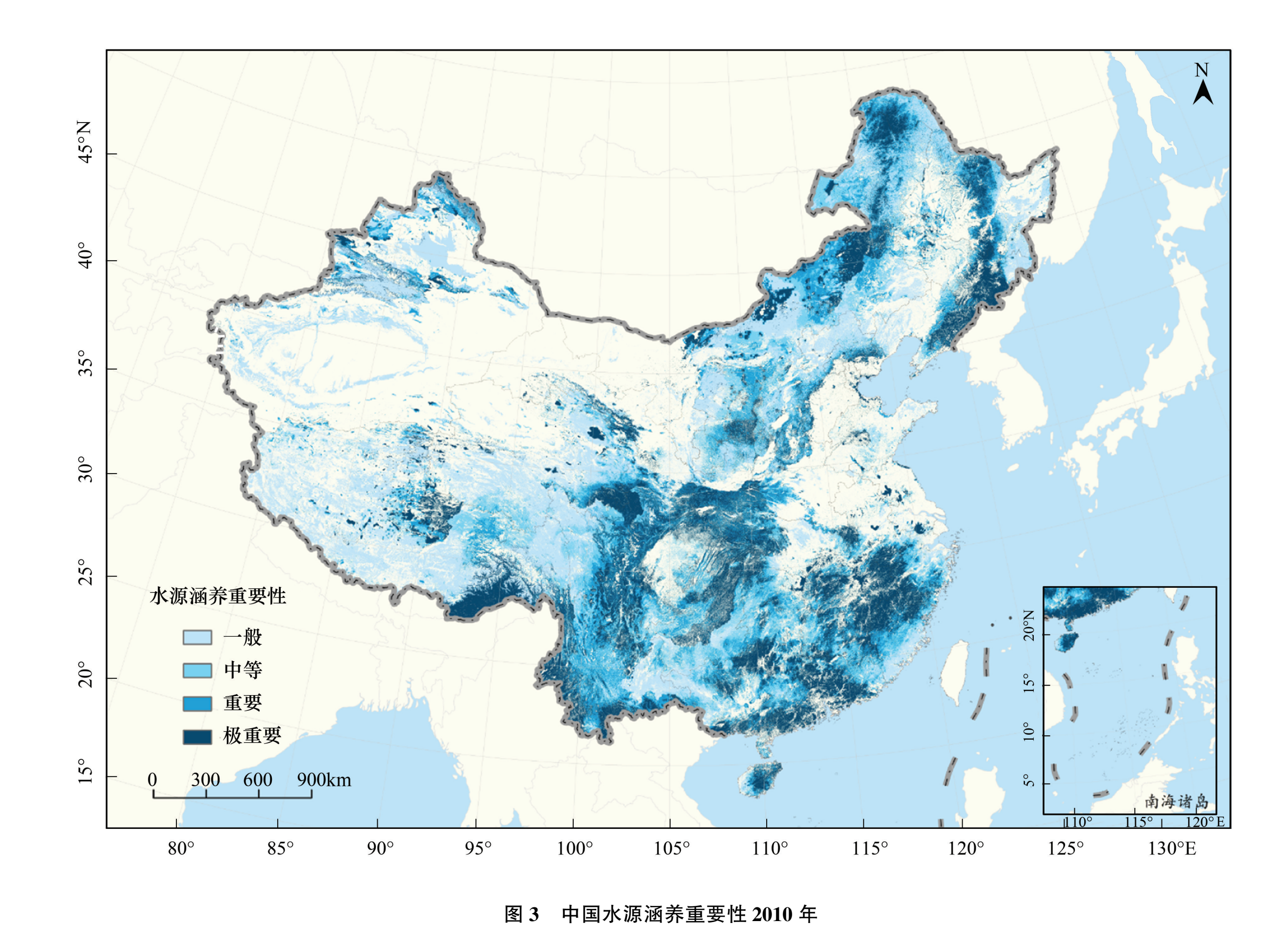


图 3　中国水源涵养重要性 2010 年

Fig.3　Spatial pattern of water conservation importance in China in 2010

表 4　水源涵养与经济人口因素相关性

Table 4　Pearson correlation among water conservation, economy and population

	经济 Economy				人口 Population	
	GDP 密度 GDP Density	GDP1 密度 GDP1 Density	GDP2 密度 GDP2 Density	GDP3 密度 GDP3 Density	人口密度 Population density	农村人口密度 Rural population density
相关性 Pearson	−0.068**	−0.018	−0.066**	−0.034	0.016	−0.052**
显著性 Significance	0.000	0.324	0.000	0.066	0.397	0.005
样本数 Samples	2892	2892	2892	2892	2892	2892

表 5　水源涵养与水质和生态工程因素相关性

Table 5　Pearson correlation among water conservation, aquatic environment and ecological projects

	水质环境 Aquatic environment			生态工程 Ecological project		
	COD 密度 COD Density	NH_3-N 密度 NH_3-N Density	SO_2 密度 SO_2 Density	天然林保护 Nature forest protection	退耕还林 Grain for green	长江中上游防护林 Afforestation of Yangtze River
相关性 Pearson	0.110**	0.086**	0.015	−0.112	−0.05	0.190**
显著性 Significance	0.000	0.000	0.426	0.364	0.226	0.000
样本数 Samples	2892	2892	2892	2892	2892	2892

(1)中国生态系统水源涵养量总体上呈现东南高西北低、由东到西逐渐递减特征。2010 年全国生态系统水源涵养总量为 12224.33 亿 m^3。森林生态系统的水源涵养作用十分显著,约占全国水源涵养总量的 60.80%。其中,常绿针叶林生态系统水源涵养总量最多,常绿阔叶林水源涵养能力最高。就我国水源涵养重

要性而言,极重要区域主要分布在相对海拔高的原始森林地带。

(2)中国生态系统水源涵养功能与气候和人类活动的关系非常密切,自然因子包括降水、温度、蒸散、坡度与水源涵养呈现显著的正相关。而人类因子除了 COD 密度和长江生态工程与水源涵养呈显著的正相关外,GDP 密度和农村人口密度与其呈明显的负相关。气候与地形因子是直接影响生态系统水源涵养量分布的主要因素,人类因子则通过改变地表生态系统格局和干扰生态系统过程,间接影响生态系统水源涵养功能。

参考文献(References):

[1] Núñez D, Nahuelhual L, Oyarzún C. Forests and water: the value of native temperate forests in supplying water for human consumption. Ecological Economics, 2006, 58(3): 606-616.

[2] 欧阳志云, 赵同谦, 赵景柱, 肖寒, 王效科. 海南岛生态系统生态调节功能及其生态经济价值研究. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1395-1402.

[3] Daily G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington: Island Press, 1997.

[4] 刘世荣, 孙鹏森, 温远光. 中国主要森林生态系统水文功能的比较研究. 植物生态学报, 2003, 27(1): 16-22.

[5] 陈东立, 余新晓, 廖邦洪. 中国森林生态系统水源涵养功能分析. 世界林业研究, 2005, 18(1): 49-54.

[6] 片冈顺, 王丽. 水源林研究述评. 水土保持科技情报, 1990, (4): 44-46, 55-55.

[7] 孙立达, 朱金兆. 水土保持林体系综合效益研究与评价. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.

[8] 李文华, 刘向华, 欧阳志云. 生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用. 北京: 中国人民大学出版社, 2008.

[9] 李凌浩, 林鹏, 王其兵, 贺金生, 何建源, 刘初钿, 金昌善, 陈仁华. 武夷山甜槠林水文学效应的研究. 植物生态学报, 1997, 21(5): 393-402.

[10] 周光益, 曾庆波, 黄全, 陈步峰, 吴仲民, 李意德, 杜志鹄. 热带山地雨林林冠对降雨的影响分析. 植物生态学报, 1995, 19(3): 201-207.

[11] Zhang B, Li W H, Xie G D, Xiao Y. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value. Ecological Economics, 2010, 69(7): 1416-1426.

[12] 吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 王宗明, 于信芳, 李爱农, 马荣华, 黄进良, 陈劲松, 常存, 刘成林, 张磊, 李晓松, 曾源, 包安明. 21 世纪前十年的中国土地覆盖变化. 第四纪研究, 2014, 34(04): 723-731.

[13] Zhou G Y, Wei X H, Luo Y, Zhang M F, Li Y L, Qiao Y N, Liu H G, Wang C L. Forest recovery and river discharge at the regional scale of Guangdong Province, China. Water Resources Research, 2010, 46(9): W09503.

[14] 王丽云, 李艳, 汪禹芹. 基于对象变化矢量分析的土地利用变化检测方法研究. 地球信息科学学报, 2014, 16(2): 307-313.

[15] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 王效科. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探——以海南岛尖峰岭热带森林为例. 应用生态学报, 2000, 11(4): 481-484.

[16] 温熙胜, 何丙辉, 张洪江, 何凡, 缪驰远. 三峡库区缓坡林地产流初探. 西南大学学报:自然科学版, 2007, 29(5): 74-80.

[17] 纪启芳, 张兴奇, 张科利, 杨勇, 杨光檄, 顾再柯. 贵州省喀斯特地区坡面产流产沙特征. 水土保持研究, 2012, 19(4): 1-5.

[18] 张晓明, 孙中锋, 张学培. 晋西黄土残塬沟壑区不同林分暴雨产流产沙作用分析. 中国水土保持科学, 2003, 1(3): 37-42.

[19] 姜萍, 郭芳, 罗跃初, 魏晶, 孙晓伟, 吴钢. 辽西半干旱区典型人工林生态系统的水土保持功能. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2905-2909.

[20] 陈奇伯, 寸玉康, 刘芝芹, 王克勤, 王利民. 滇西高原不同地类坡面产流产沙规律研究. 水土保持研究, 2005, 12(2): 71-73.

[21] 李元寿, 王根绪, 沈永平, 王军德, 王一博. 长江源区不同植被覆盖下产流产沙效应初步研究. 冰川冻土, 2005, 27(6): 869-875.

[22] 赵焕胤, 朱劲伟. 林带和牧草地径流的研究. 水土保持学报, 1994, 8(2): 56-61.

[23] 景元书, 张斌, 王明珠, Thimm A, Zepp H. 桔园地土壤水分与径流的坡位差异研究. 水土保持学报, 2004, 18(2): 74-77.

[24] 鲁绍伟, 毛富玲, 靳芳, 余新晓, 饶良懿. 中国森林生态系统水源涵养功能. 水土保持研究, 2005, 12(4): 223-226.

[25] Hartanto H, Prabhu R, Widayat A S E, Asdak C. Factors affecting runoff and soil erosion: plot-level soil loss monitoring for assessing sustainability of forest management. Forest Ecology and Management, 2003, 180(1/3): 361-374.

[26] 尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 戴尔阜. 过去 30 年气候变化对黄河源区水源涵养量的影响. 地理研究, 2016, 35(1): 49-57.